

(19) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

(12) Offenlegungsschrift  
(10) DE 44 42 045 A1

(51) Int. Cl. 6:  
G 02 B 5/28  
G 02 B 1/00

DE 44 42 045 A1

(21) Aktenzeichen: P 44 42 045.5  
(22) Anmeldetag: 25. 11. 94  
(43) Offenlegungstag: 30. 5. 96

(71) Anmelder:  
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

(74) Vertreter:  
PFENNING MEINIG & PARTNER, 80336 München

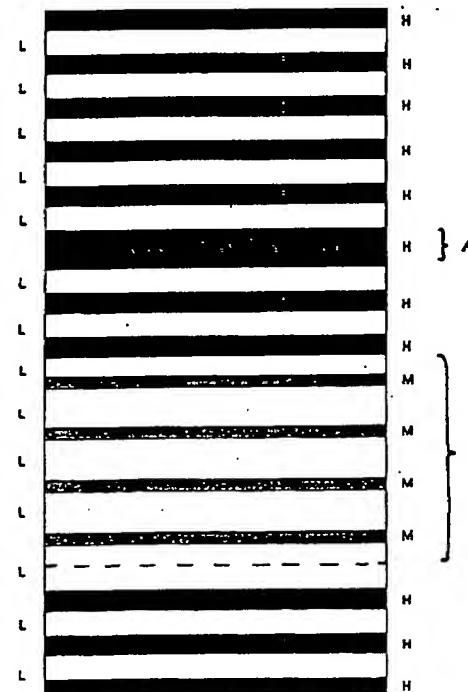
(72) Erfinder:  
Schallenberg, Uwe, 07749 Jena, DE; Uhlig, Hein,  
07747 Jena, DE

(56) Entgegenhaltungen:  
DE 24 49 312 A1  
GB 12 70 042  
US 53 37 191  
US 40 45 125  
JP 62-1 78 908  
H.A. Macleod: Thin-film optical filters, Bristol 1986,  
S. 504-508;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Interferenzfilter

(55) Die Erfindung betrifft ein optisches Interferenzfilter zur Filterung eines bestimmten Spektralbereiches aus dem elektromagnetischen Spektrum im UV-, VIS- und NIR-Bereich. Das Interferenzfilter soll als 1-Systemfilter (besteht nur aus einem auf dem Substrat abgeschiedenen Schichtsystem) ausgeführt sein, das auch optische Parameter erreicht, wie sie bisher nur Filter leisten, die mindestens zwei inkohärent miteinander verbundene Filterkomponenten enthalten, und bei dem gegenüber bekannten 1-Systemfiltern mit ähnlichen optischen Parametern, die mindestens zwei kohärent miteinander verbundene Filterkomponenten enthalten, die Anzahl der Schichten wesentlich reduziert ist. Dabei ist es besonders wesentlich, die Eigenschaften eines All-Dielektrikfilters mit einem aus dielektrischen und metallischen Schichten gebildeten Stützsystem S zu verbessern und dieses unsymmetrisch um die Abstandsschicht A in das All-Dielektrikfilter einzubauen.



DE 44 42 045 A1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein optisches Interferenzfilter zur Filterung eines bestimmten Spektralbereiches aus dem elektromagnetischen Spektrum im UV-, VIS- und NIR-Bereich wesentliche Anwendungsbereiche solcher Interferenzfilter sind die optische Meßtechnik und die Optik für Photo-, Print- und Videotechnik und dabei insbesondere der Bereich optischer Sensoren und mikrooptische und mikroelektronische Verwendungsmöglichkeiten.

Interferenzfilter gehören zu den klassischen Anwendungen dünner optischer Schichten. Von Geffcken [W. Geffcken, DRP 716,153 (1942)] wurde das erste Dünnschicht-Fabry-Perot-Filter durch Aufdampfen im Hoch-Vakuum praktisch realisiert, indem zwischen zwei hochreflektierende, aber noch teildurchlässige Metallschichten eine dielektrische Abstandsschicht mit definiert eingestellter Dicke angeordnet wurde. Die Schichtfolge Metall-schicht/Dielektrische Schicht/Metallschicht ist als Metall-Dielektrik-Filter der erste von drei Filtergrundtypen.

Die hochreflektierenden Metallschichten in der Fabry-Perot-Anordnung sind sehr schnell durch dielektrische Wechselschichtsysteme ersetzt worden [H. D. Polster, J. Opt. Soc. Am. 42, 347–350 (1952)]. Sowohl die Abstandsschicht als auch die Reflektoren sind jetzt rein dielektrische Schichten, das so bezeichnete All-Dielektrik-Filter ist der zweite Filtergrundtyp.

Die Interferenz in dünnen optischen Schichten ermöglicht auch die Entspiegelung von Metallschichten. Von Berning und Turner [P. H. Berning and A. F. Turner, J. Opt. Soc. Am. 47, 230–239 (1957)] stammt dazu die Theorie der Induzierten Transmission. Der Schichtaufbau dielektrisches Schichtsystem/Metallschicht/dielektrisches Schichtsystem unter der Bedingung, daß die Reflexion des Systems bei der Filterwellenlänge Null ist, wird als Induced-Transmission-Filter bezeichnet und stellt den dritten Filtergrundtyp dar.

Die Qualität und Eignung von Interferenzfiltern wird durch seine Filterfunktion bestimmt, wesentlich ist dabei der Verlauf der Transmission in Abhängigkeit Von der Wellenlänge, mit einem Durchlaßbereich hoher Transmission und einem Sperrbereich sehr niedriger Transmission.

Folgende Parameter sind dabei wesentlich:

- die Peaktransmission (maximale Transmission im Durchlaßbereich);
- die Halbwertsbreite (spektrale Breite des Durchlaßbereiches bei der halben Peaktransmission);
- der Q-Wert (Form des Durchlaßbereiches als Quotient aus Zehntelwertsbreite und Halbwertsbreite, wobei die Zehntelwertsbreite die spektrale Breite bei einem Zehntel der Peaktransmission ist);
- die Mittenwellenlänge, (eigentliche Filterwellenlänge);
- die Blocktiefe (maximal zulässige Transmissionswert im Sperrbereich) und
- den Sperrbereich selbst durch Angabe des Wellenlängenbereiches, indem die Blocktiefe erreicht werden muß.

Notwendig ist bei der Festlegung der Filterfunktion immer ein Kompromiß zwischen der zu erreichenden Peaktransmission im Durchlaßbereich, der Blocktiefe im Sperrbereich und der Breite des Sperrbereiches, da die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Sperrbereiches immer auch die Transmission im Durchlaßbereich beeinflussen.

Bei den bisher bekannten Interferenzfiltern ist für die Filterung eines bestimmten Spektralbereiches aus dem elektromagnetischen Spektrum die Blockung unerwünschter Strahlung erforderlich, d. h. die nahezu Vollständige Unterdrückung der durchgehenden Strahlung in einem breiten Spektralbereich. Dazu reichen die genannten Filtergrundtypen nicht aus, so daß zusätzliche Blockelemente, die eine weitere, spektral abhängige Unterdrückung der einfallenden Strahlung ermöglichen, verwendet werden müssen. Blockelemente können z. B. Glasfilter (Farbgläser) oder auch Dünnschichtanordnungen sein. Metall-Dielektrik-Filter und Induced-Transmission-Filter werden z. B. als Blockelemente für All-Dielektrik-Filter eingesetzt. Weitere Blockfilter aus rein dielektrischen Schichten, z. B. Lang- und Kurzpaßfilter, können zusätzlich entsprechend gestellter Anforderungen an den Sperrbereich notwendig sein.

Interferenzfilter, die die gestellten Anforderungen erfüllen sollen und einem der genannten drei Filtergrundtypen zugehörig sind, werden in der Regel durch Hinzuziehung von Blockelementen, mit denen in Verbindung mit dem Filtergrundtyp die Parameter des Sperrbereiches erreicht werden, gebildet. Beide werden in der Regel inkohärent, d. h. ohne Interferenz ermöglichte Kopplung durch geeignete Kitte, in einer festen Halterung mit entsprechendem Luftabstand oder in beliebigem Abstand ohne direkte Kombination miteinander verbunden. Im Gegensatz dazu ist eine kohärente Kopplung zwischen Filter und Blockelementen möglich, wenn Filtergrundtyp und Blockelement, z. B. ein All-Dielektrik-Filter als Filtergrundtyp und ein Metall-Dielektrik-Filter als Blockfilter, in einem Schichtsystem durch eine geeignete dielektrische Kopplungsschicht miteinander verbunden und in einem Beschichtungsvorgang hergestellt werden.

Es ist weiter bekannt, diese Schichtsysteme auf Substraten abzuscheiden, die beispielsweise auch als Glasfilter wirken können. Dabei bestimmt das Volumen die Absorptionswirkung der Glasfilter und eine bestimmte Dicke ist erforderlich, um die gewünschte Blockung zu erreichen. Dies führt zu Gesamtdicken des kompletten Interferenzfilters von mindestens einigen Millimetern.

Der Filteraufbau erfordert auch eine mechanische Fassung oder einen alle Elemente in ihrer Lage fixierenden Kitrand. Dies bewirkt zwar einen mechanischen Schutz der Schichtkomponenten gegen Einwirkungen der Umwelt, erhöht aber auch Masse, Größe und Herstellungsaufwand.

Bei bekannten Metall-Dielektrik-Filters werden wenigstens drei Schichten in der Folge Metall/Dielektrische Schicht/Metall eingesetzt. Die gesamte Dicke der Metallschichten wird im wesentlichen durch die gewünschte Teildurchlässigkeit im Durchlaßbereich des Filters bestimmt. Die Materialauswahl zu den Metallschichten berücksichtigt den Quotient aus Absorptions- zu Brechungsindex im Durchlaßbereich des Filters und die

Änderung des Quotienten im Sperrbereich. Die Mittenwellenlänge des Filters bestimmt die Dicke der Abstandsschicht, unter Berücksichtigung der Phasenanpassung an die Metallschicht. Die Abstandsschicht kann zur Verringerung der Halbwertsbreite des Filters in höherer Ordnung gewählt werden.

Für All-Dielektrik-Filter werden alternierend hoch- und niedrigbrechende Schichten aus im Durchlaßbereich des Filters nahezu absorptionsfreien Materialien eingesetzt, deren optische Dicke jeweils  $1/4$  der Mittenwellenlänge beträgt (Lambda/Viertel-Schichten). Die mittig angeordnete Abstandsschicht ist aus dem hoch- oder niedrigbrechenden Material gebildet und hat eine Dicke von  $\lambda/2$  der Mittenwellenlänge oder weist eine Dicke in höherer Ordnung davon auf. Es kann auch ein weiteres Material im Wechselschichtsystem verwendet werden, dessen Brechzahl zwischen denen der anderen beiden Materialien liegt.

Bei den Induced-Transmission-Filttern ist zur Phasenanpassung an die zwischen den Reflektoren befindliche Abstandsschicht, die in diesem Fall metallisch ist, eine dielektrische Schicht mit einer von  $\lambda/4$  abweichenden optischen Dicke analog den Metall-Dielektrik-Filttern vorhanden. Es sind auch mehrere Metallschichten mit dazwischenliegenden dielektrischen Schichten einsetzbar [J. H. Apfel, Appl. Opt. 6, 1303–1312 (1972)]. Dadurch kann bei relativ kleiner Verringerung der Transmission im Durchlaßbereich die Absorptionswirkung im Sperrbereich verbessert werden.

Auf Grund relativ starker Änderungen der komplexen Brechzahl mit der Wellenlänge im Bereich guter Durchlässigkeit der Metallschichten ist es sinnvoll, die Dicke der einzelnen Schichten und die Anzahl der Perioden aufeinander abzustimmen. Die Berechnungen zu den Wechselschichtsystemen und den Schichtendicken zur Phasenanpassung unterliegen bei den Induced-Transmission-Filttern der speziellen Bedingung, daß die Reflexion des Gesamtsystems für die Filterwellenlänge Null ist. Dazu werden aus der Theorie der Induzierten Transmission abgeleitete Formeln eingesetzt [H. A. Macleod, Thin-Film Optical Filters, 2nd ed., p. 292–311 (Hilger, Bristol 1986)].

Alle drei Filtergrundtypen können im Mehr-Cavity-Design ausgebildet sein. Cavity bezeichnet die Anordnung einer Abstandsschicht zwischen zwei Reflektoren. Damit kann durch Hintereinanderschaltung mehrerer Einheiten die Form des Durchlaßbereiches des Filters beeinflußt werden. In diesem Fall ist jeweils eine dazwischenliegende geeignete Kopplungsschicht erforderlich.

Der Transmissionsverlauf im Durchlaßbereich des Filters zeigt in der 1-Cavity-Anordnung eine dreieckige Form und wird durch 2-Cavity, 3-Cavity, usw. mit zunehmender Cavity-Zahl rechteckiger. Dabei kann in den einzelnen Cavities eine unterschiedliche Ordnungszahl der Abstandsschicht (verschiedene ganzzahlige Vielfache von  $\lambda/2$ ) und unterschiedliche Reflexion bei den Reflektoren verwendet bzw. ausgenutzt werden. Es besteht somit die Möglichkeit, die Halbwertsbreite der Filter in Richtung Erhöhung zu beeinflussen.

Bei den bekannten optischen Interferenzfiltern ist der Einsatz verschiedener Komponenten und verschiedener Technologien zu ihrer Herstellung üblich. Filter, die komplett nur aus einem Schichtsystem bestehen (1-Systemfilter) mit dem Substrat als Glasfilter und darauf abgeschiedenem Schichtstapel, gibt es nur für wenige Parameterwerte. Metall-Dielektrik-Filter und Induced-Transmission-Filter können so ausgeführt werden, weisen dann aber immer Halbwertsbreiten von mehreren Prozent der Filterwellenlänge und in der Regel nur geringe Blocktiefen auf. Für das Erreichen kleiner Halbwertsbreiten sind höhere Ordnungen in den Abstandsschichten und für große Blocktiefen ist der Mehr-Cavity-Einsatz erforderlich. Das zwingt zum zusätzlichen Einsatz von Blockelementen, gestattet jedoch trotzdem nicht Halbwertsbreiten kleiner 1% der Filterwellenlänge. Ebenso ist die Formung des Durchlaßbereiches zum Rechteck durch den Mehr-Cavity-Einsatz bei Metall-Dielektrik-Filtern eingeschränkt und bei Induced-Transmission-Filter erschwert bzw. gegenwärtig nicht bekannt.

Die All-Dielektrik-Filter gestatten nahezu beliebige Halbwertsbreiten und ermöglichen im Mehr-Cavity-Einsatz sehr geringe Q-Werte, d. h. gute Formung des Durchlaßbereiches zum Rechteck mit spektral sehr steilen Übergängen vom Durchlaßbereich zum Sperrbereich. Sie erfordern jedoch immer die Kombination mit mindestens zwei Blockelementen. Zur Sicherung der Transmission, die die rein dielektrischen Schichten theoretisch ermöglichen, werden Blockelemente in Form von Glasfiltern und dielektrische Blockfilter eingesetzt. Es müssen mindestens drei inkohärent miteinander verbundene Komponenten verwendet werden. Kombiniert man All-Dielektrik-Filter, wie bereits beschrieben, mit einem Metall-Dielektrik-Filter oder einem Induced-Transmission-Filter, so treten erhebliche Transmissionsverluste auf.

Bei den herkömmlichen Interferenzfiltern ist ein hoher Herstellungsaufwand erforderlich. Die zur Verbindung und zum Schutz verwendeten Kitte bedingen verschiedene Technologien und größere Filterabmessungen. Außerdem ist eine Strukturierung nur begrenzt möglich. Bekannte 1-Systemfilter weisen hohe Schichtenzahlen auf, und es lassen sich nicht alle gewünschten Parameter erreichen. Dieser Stand der Technik schränkt insbesondere den Einsatz der Filter für aktuelle Anwendungen in der Optosensorik, der Mikrooptik und der Mikrosystemtechnik, insbesondere durch ihre nach wie vor bedingte Größe, stark ein.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein optisches Interferenzfilter zur Filterung eines bestimmten Spektralbereiches aus dem elektromagnetischen Spektrum im UV-, VIS- und NIR-Bereich zu schaffen, das als 1-Systemfilter (besteht nur aus einem auf dem Substrat abgeschiedenen Schichtsystem) auch optische Parameter erreicht, wie sie bisher nur Filter leisten, die mindestens zwei inkohärent miteinander verbundene Filterkomponenten enthalten, und bei dem gegenüber bekannten 1-Systemfiltern mit ähnlichen optischen Parametern, die mindestens zwei kohärent miteinander verbundene Filterkomponenten enthalten, die Anzahl der Schichten wesentlich reduziert ist.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 enthaltenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Interferenzfilters ergeben sich mit den in den untergeordneten Ansprüchen genannten Merkmalen.

Dabei ist es besonders wesentlich, die Eigenschaften von All-Dielektrikfiltern zu verbessern und dabei ein aus mehreren Dielektrik- und Metallschichten gebildetes Stützsystem unsymmetrisch in das Filter einzubauen. Vorteilhaft erfolgt der Einbau unsymmetrisch zur Abstandsschicht (Kopplungsschicht) eines im Cavity-Design

ausgebildeten Filters.

Das Stützsystem soll dabei aus mehreren hintereinander angeordneten Metallschichten, die von dielektrischen Schichten eingeschlossen sind, gebildet sein. Die Summe der Dicken der eingebauten Metallschichten sollte zumindest im Bereich der Metallmindestdicke sein, um die gewünschte Blocktiefe bei nach wie vor ausreichender Transmission mit dem erfundungsgemäßen Filter zu erreichen.

Mit der Erfindung wird ein Schichtdesign bereitgestellt, das eine erhebliche Reduzierung des Aufwandes bei der Herstellung von optischen Interferenzfiltern mit nur einer Herstellungstechnologie erreicht. Im Normalfall ist die gesamte Dicke der Filter nur unwesentlich größer als die Substratdicke. Ein weiterer Vorteil ist die Vereinfachung des Entwurfs bestimmter Interferenzfilter für eine vorgegebene Mittenwellenlänge und andere vorgegebene Parameter.

Die erfundungsgemäßen optischen Filter eignen sich besonders für den Einsatz in Verbindung mit optischen Sensoren, in der Mikrooptik und der Mikrosystemtechnik. So ausgebildete Filter ermöglichen beispielsweise Strukturierungen bei mikrooptischen Bauelementen.

Nachfolgend soll die Erfindung allgemein und an einem speziellen Ausführungsbeispiel beschrieben werden.

Dabei zeigen:

Fig. 1 In einem Diagramm den Verlauf der Potentiellen Transmission  $\Psi^x$  des Basissystems aus  $\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$  bei der Wellenlänge 300 nm in Abhängigkeit von der Metallschichtdicke  $d_M$  mit dem Parameter Periodenanzahl  $x$ ;

Fig. 2 in einem zweiten Diagramm den Admittance-Verlauf eines Basissystems aus  $\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$  bei der Wellenlänge 300 nm in Abhängigkeit von der Metallschichtdicke  $d_M$  und Admittancewerte des All-Dielektrik-Filters mit dem Parameter Periodenexponent;

Fig. 3 in einem dritten Diagramm die Reflexion eines erfundungsgemäßen Filters gegen Luft bei der Wellenlänge 300 nm in Abhängigkeit der wachsenden Schichtdicke in der relativen Einheit Schichtenzahl;

Fig. 4 in einem vierten Diagramm die Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge für ein erfundungsgemäßes Filter für 300 nm auf Quarzglas mit Berücksichtigung der Glasrückseite;

Fig. 5 in einem weiteren Diagramm die Transmission in logarithmischer Darstellung in Abhängigkeit von der Wellenzahl (reziproke Wellenlänge) für das erfundungsgemäße Filter für 300 nm, auf Quarzglas mit Berücksichtigung der Glasrückseite;

Fig. 6 den Vergleich der Transmission in logarithmischer Darstellung in Abhängigkeit von der Wellenzahl (reziproke Wellenlänge) für das erfundungsgemäße Filter (metallgestützt), ein vergleichbares Filter aus All-Dielektrik-Filter und kohärent gekoppeltem Induced-Transmission-Filter (ADF + ITF kohärent) und einem vergleichbaren Filter aus inkohärent verbundenen All-Dielektrik-Filter, UV-Farbglass und dielektrischen Kurzpaß (ADF + Farbgl. + KPF inkohärent);

Fig. 7 schematisch den Reflexionsverlauf bei der Mittelwellenlänge in Abhängigkeit der geometrischen Dicke der einzelnen Schichten eines erfundungsgemäßen metallgestützten Interferenzfilters, und

Fig. 8 schematisch den Schichtaufbau des erfundungsgemäßen metallgestützten Interferenzfilters.

Für ein erfundungsgemäße Filter kann ein All-Dielektrik-Filter an einer geeigneten Stelle durch ein definiertes Teilsystem aus dielektrischen und metallischen Schichten, einem sogenannten Stützsystem, erweitert werden, so daß die erforderliche Absorption erreicht und die zulässige Transmission nicht unterschritten wird, ohne daß zusätzliche Blockelemente eingesetzt werden müssen. Beim Entwurf eines solchen Filters werden die interferenzoptischen Zusammenhänge mit Hilfe eines Algorithmus behandelt, um Entscheidungen entsprechend den optischen Anforderungen treffen zu können. Wird dabei kein eindeutiges Ergebnis erhalten, kann der Zyklus mit entsprechenden Datenänderungen erneut durchlaufen werden. Bevorzugt wird das in einem solchen Fall verwendete Metallmaterial für das Stützsystem ausgetauscht. Auf diese Weise können Interferenzfilter als 1-Systemfilter für beliebige Parametersätze entworfen werden. Hierfür ist die Nutzung eines Programms zur Berechnung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in geschichteten Medien erforderlich, das in verschiedenen Varianten verfügbar ist.

Ausgegangen wird bei der Lösung von der gewünschten Filterfunktion, die durch das Interferenzfilter realisiert werden soll, insbesondere sind Transmission und Reflexion zu berücksichtigen. Zu beachten ist auch der Kompromiß zwischen Peaktransmission und Blocktiefe sowie das Design eines auch praktisch herstellbaren All-Dielektrik-Filters, dessen Durchlaßbereich in Form und Breite der gewünschten Filterfunktion entspricht. Dabei wird auf die bekannten Verläufe der Brechzahlen in Abhängigkeit von der Wellenlänge der in dem All-Dielektrik-Filter verwendeten, im Durchlaßbereich des Filters praktisch absorptionsfreien dielektrischen Materialien zurückgegriffen. Erforderlich ist jetzt die Realisierung der Blockung im Sperrbereich bei Einhaltung der zulässigen Peaktransmission.

Für den Entwurf eines bestimmten Filters mit vorgegebenen Parametern, die dieser einhalten soll, wird ein metallisches Material ausgewählt, mit dem im Durchlaßbereich des Filters teildurchlässige Schichten hergestellt werden können. Voraussetzung sollte jedoch sein, daß das Herstellungsverfahren für die Metallschicht mit dem der dielektrischen Schichten für das All-Dielektrik-Filter kombinierbar ist (beispielsweise Beschichtung im Vakuum). Dabei muß der Verlauf der komplexen Brechzahl in Abhängigkeit von der Wellenlänge für das ausgewählte Metall bekannt sein. Bevorzugte Metalle sind Aluminium, Silber, Gold, Rhodium oder Kupfer. Für dieses Material wird dann die Metallmindestdicke, das ist die Dicke, die eine Einzelschicht besitzen muß, um eine Transmission der Schicht gegen die Außenmedien mit der Brechzahl 1 im gesamten Sperrbereich des gewünschten Filters kleiner oder gleich der geforderten Blocktiefe zu erreichen, mit bekannten Formeln berechnet.

Weiter wird mit diesem Material und einem der Materialien, das  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  oder  $\text{LaF}_3$  sein kann, ein Aufbau aus drei Schichten gewählt, der nachfolgend als Basissystem bezeichnet wird. Die erste Schicht des Basissystems besteht aus dem praktisch absorptionsfreien Material und wird als Phasenschicht bezeichnet, daran schließt sich die Metallschicht als teildurchlässige Schicht

aus dem metallischen Material an, und die danach folgende dritte Schicht ist mit der ersten identisch. Für dieses Basissystem wird jetzt die potentielle Transmission in Abhängigkeit von der Dicke der Metallschicht bis zur Metallmindestdicke unter der Bedingung berechnet, daß die Reflexion des Systems bei der Mittenwellenlänge des konzipierten Filters Null ist, was wieder mit aus der Theorie der Induzierten Transmission bekannten Formeln durchgeführt wird.

Die so berechneten Werte werden ganzzahlig bis etwa zum Exponentenwert 6 potenziert und alle Werte in ein Diagramm gezeichnet (Fig. 1). Nachfolgend wird die Metallmindestdicke durch die Exponenten geteilt und entsprechend dieser Teildicken werden die zugehörigen Werte der potenzierten potentiellen Transmission im Diagramm markiert. Die erforderliche Peaktransmission wird zusätzlich als Mindesttransmission durch eine — Gerade dargestellt. Mit dieser Vorarbeit ist es möglich, den Exponenten, dessen zugehöriger Teildickenwert eine mit diesem Exponenten potenzierte potentielle Transmission liefert, die bezüglich abnehmender Schichtdicke das erste Mal gleich oder größer der Mindesttransmission ist, zu bestimmen. Der Schnittpunkt der zu diesem Exponenten gehörigen Kurve der potentiellen Transmission mit der Mindesttransmission liefert, die maximale Stützdicke  $d_{smax}$ . Der zugehörige Teildickenwert des darauf folgenden Exponenten wird als minimale Stützdicke  $d_{smin}$  definiert. Diese minimale Stützdicke  $d_{smin}$  sollte bestimmt werden, um zu berücksichtigen, daß es für periodische Metall/Dielektrik-Stapel sinnvoll ist, möglichst dicke Schichten einzubringen, aber mit möglichst hoher Periodenzahl und mit hoher potentieller Transmission zu arbeiten.

Der nächste Schritt ist dann die Berechnung der Admittance für das gewählte Basissystem in Abhängigkeit von der Dicke der Metallschicht bis zur Metallmindestdicke. Dabei wird wiederum, wie bereits beschrieben, unter der Bedingung berechnet, daß die Reflexion des Systems bei der Mittenwellenlänge des konzipierten Filters Null ist, und der ermittelte Verlauf in einem Diagramm (Fig. 2) dargestellt. In dieses Diagramm werden auch die minimale und maximale Stützdicke aufgenommen. Der dann entnehmbare mögliche Dickenbereich liefert einen den Wünschen entsprechenden breiten Admittancebereich.

Anschließend daran wird die Admittance für das All-Dielektrik-Filter nach bekannten Methoden der Interferenzschichtoptik für die Stellen im Schichtaufbau berechnet, bei denen bei der Mittenwellenlänge ausschließlich reelle Admittancewerte vorliegen. Zur Verallgemeinerung wird für das Außenmedium mit der Brechzahl 1 gerechnet. Die reellen Admittanzen werden mit den zugehörigen Schichtzahlen in das Admittancediagramm (Fig. 2) für das Basissystem eingezeichnet. Daraus wird die Admittancegerade, die den Admittanceverlauf des Basissystems zwischen der minimalen und der maximalen Stützdicke schneidet, ausgewählt (in Fig. 2, p = 3). Kommen dabei zwei Möglichkeiten in Betracht, wird die die größere Schichtdicke liefernde weiter verwendet. Die entnehmbaren Werte für Schichtdicke und Admittance werden mit Stützdicke bzw. Stützadmittance bezeichnet. Der Wert der potentiellen Transmission für die Stützdicke innerhalb des durch die Teildicken begrenzten Transmissionsbereiches liefert den entsprechenden Stützexponenten, im Beispiel  $x = 4$ .

Ist kein Schnittpunkt des Admittanceverlaufs mit einer Admittancegeraden ermittelbar, kann die geforderte Blockung mit dem ausgewählten Materialien nicht erreicht werden, das ausgesuchte All-Dielektrik-Filter kann für das Blockverfahren ungeeignet sein, oder die Parameter der Filterfunktion sind mit einem 1-Systemfilter nicht realisierbar. In diesem Fall wird das ganze Verfahren mit der Auswahl eines anderen geeigneten metallischen Materials, eines anderen dielektrischen Materials in dem Basissystem, mit einem anderen geeigneten All-Dielektrik-Filter oder mit geänderter Filterfunktion an entsprechender Stelle erneut durchgeführt.

Für bestimmte Anwendungen, bei denen Abstriche an die geforderten Parameter gemacht werden können, kann geprüft werden, welche Parameter ohne exakte Anpassung, d. h. ohne vorliegen eines Schnittpunktes, erreichbar sind. In diesem Fall wird die minimale Stützdicke als Stützdicke gesetzt, der zur entsprechenden potentiellen Transmission zugehörige Exponent wird dann Stützexponent und als Stützadmittance gilt in diesem Fall der nächstliegende Wert einer Admittancegeraden des All-Dielektrik-Filters.

Das eigentliche Stützsystem S wird dann — entsprechend der Anzahl, die durch den Stützexponenten  $x$  vorgegeben wird — durch mehrfache Aneinanderreihung des aus Metallschicht mit der Stützdicke und den beidseitig angelagerten identischen Phasenschichten bestehenden Basissystems gebildet. Abschließend wird das All-Dielektrik-Filter an der durch die Stützadmittance definierten Stelle mit dem Stützsystem erweitert und bleibt ansonsten unverändert. In diesem neuen Design wird es als metallgestütztes Interferenzfilter bezeichnet. Da nach den Bedingungen der Induzierten Transmission die Reflexion durch das Stützsystem bei entsprechend angepaßten Außenmedium Null ist, wird die Reflexion im All-Dielektrik Filter durch das eingeschobene Stützsystem nicht verändert. Im Gegensatz dazu wird aber die Transmission auf Grund der eingeschobenen Metallschichten etwas vermindert.

Alle Parameter der Filterfunktion des metallgestützten Filters können vorab bestimmt und mit den Vorgaben verglichen werden.

Werden die Vorgaben nicht erreicht, ist eine erneute Bestimmung mit anderen Materialien oder anderem Aufbau des Filters durchzuführen.

Das nach der vorgeschlagenen Methode entworfene metallgestützte Interferenzfilter ist immer ein 1-Systemfilter und unter den eingangs genannten Voraussetzungen mit einem Beschichtungsverfahren herstellbar. Die Anzahl der Schichten ist für die geforderte Filterfunktion interferenzoptisch immer ein absolutes Minimum.

In der Fig. 7 ist für ein ausgeführtes erfundungsgemäßes Interferenzfilter die Reflexion für die einzelnen Schichten ähnlich wie in der Fig. 3 dargestellt. Dabei wird das Stützsystem S nachfolgend an ein Schichtsystem aus reinen Dielektrikenschichten mit jeweils alternierend aufgebrachten, optisch hoch und niedrig brechenden Materialien einseitig vor der Abstandsschicht HA des Filters angeordnet. Auf der anderen Seite der Abstandsschicht HA schließt sich wieder ein System von Dielektrikenschichten, die wieder alternierend optisch hoch und niedrig brechend angeordnet sind, an.

Das Stützsystem S kann aber auch in entgegengesetzter Richtung nach der Abstandsschicht HA aufgebracht sein.

In der Fig. 8 ist der Schichtaufbau eines erfindungsgemäßen Interferenzfilters dargestellt. Dabei schließen sich an das Substrat jeweils wechselnd hoch und niedrig brechende  $\lambda/4$  Dielektrischschichten H, L an, danach wird das aus niedrigbrechenden, dielektrischen Schichten L und Metallschichten M gebildete Stützsystem S eingefügt und wiederum daran anschließend können entweder erneut, wie bereits beschrieben, alternierend dielektrische Schichten L, H oder die Abstandsschicht HA, aus einem hochbrechenden Material, direkt aufgebracht sein. Anschließend an die Abstandsschicht HA folgen wieder alternierend dielektrische  $\lambda/4$  Schichten L, H.

## Beispiel

10 Gesucht wird ein UV-Interferenzfilter für 300 nm, dessen Filterfunktion durch folgende Parameter gegeben ist:

Mittelwellenlänge  $\lambda_0 = 300 \text{ nm}$

Peaktransmission  $T_{\max} \geq 30\%$

Halbwertsbreite HWB  $\leq 2 \text{ nm}$

15 Zehntelwertsbreite ZWB  $\leq 5 \text{ nm}$

Blockbereich 200–270 nm und 340–1000 nm

Blocktiefe  $T_S < 0,01\%$ .

Die Filterfunktion kann im Durchlaßbereich von 270 – 340 nm mit einem All-Dielektrik-Filter aus hochbrechenden  $\text{ZrO}_2$ - und niedrigbrechenden  $\text{SiO}_2$ -Schichten auf Quarzglas als Substrat mit dem Design

$$20 1,5[(H L)^5 2H(L H)^5] 1,0$$

realisiert werden. H und L stehen für die hoch- bzw. niedrigbrechenden Schichten mit der optischen Dicke von  $\lambda_0/4$  und den Brechzahlen  $n_H$  und  $n_L$ . 2H steht für eine H-Schicht mit dem Dickenfaktor 2. Die Exponenten bedeuten, daß die Periode (H L) so oft wiederholt wird. Die Zahlen vor bzw. nach der eckigen Klammer kennzeichnen das Substrat mit der Brechzahl  $n_S$  bzw. die Brechzahl  $n_0$  auf der Seite des Lichteinfalls. Für die verwendeten Brechzahlen in ihrer Abhängigkeit von der Wellenlänge gilt Tabelle 1.

Die Auslegung eines metallgestützten Filters für das gewünschte UV-Interferenzfilter erfolgt nach folgenden Schritten:

- 30 1. Aluminium wird als metallisches Material gewählt, dabei gilt für den Verlauf von Brechungsindex  $n_M$  und Absorptionsindex  $k_M$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge Tabelle 1.
2. Die für die Blocktiefe notwendige Metallmindestdicke wird mit  $d_{\min} = 70 \text{ nm}$  mit bekannten Formeln berechnet.
- 35 3. Für die Phasenschicht im Basissystem wird das niedrigbrechende Material gewählt, das Basissystem hat dann die Form  $\text{SiO}_2$ -Schicht/Al-Schicht/ $\text{SiO}_2$ -Schicht. Die Fig. 1 zeigt den Verlauf der Potentiellen Transmission  $\Psi$  des Basissystems in Abhängigkeit von der Metallschichtdicke  $d_M$  unter der Bedingung, daß die Reflexion des Systems bei der Mittenwellenlänge Null ist. Die Berechnung erfolgt nach den aus der Theorie der induzierten Transmission bekannten Formeln

$$40 \Psi = \left[ \frac{n_M^2 - k_M^2 - 2n_M k_M (Z/X)}{(n_M^2 + k_M^2)} (\sin^2 \alpha \cosh^2 \beta + \cos^2 \alpha \sinh^2 \beta) \right. \\ \left. + (\cos^2 \alpha \cosh^2 \beta + \sin^2 \alpha \sinh^2 \beta) \right]^{-1} \quad (1)$$

$$50 + \frac{1}{X} (n_M \sinh \beta \cosh \beta + k_M \cos \alpha \sin \alpha) \\ + \frac{X^2 + Z^2}{X(n_M^2 + k_M^2)} (n_M \sinh \beta \cosh \beta - k_M \cos \alpha \sin \alpha) \left]^{-1} \right.$$

55 mit

60

65

$$X = \left[ \frac{(n_M^2 + k_M^2)(n_K \sinh \beta \cosh \beta + k_K \cos \alpha \sin \alpha)}{n_K \sinh \beta \cosh \beta - k_K \cos \alpha \sin \alpha} \right]^{1/2} \quad (2)$$

5

$$= \frac{n_M^2 k_M^2 (\sin^2 \alpha \cosh^2 \beta + \cos^2 \alpha \sinh^2 \beta)^{1/2}}{(n_K \sinh \beta \cosh \beta - k_K \cos \alpha \sin \alpha)^2}$$

10

$$Z = \frac{n_K k_M (\sin^2 \alpha \cosh^2 \beta + \cos^2 \alpha \sinh^2 \beta)}{n_K \sinh \beta \cosh \beta - k_K \cos \alpha \sin \alpha} \quad (3)$$

15

und

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} n_K d_M \quad (4)$$

20

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} k_M d_M \quad (5)$$

25

4. Aus dem Diagramm in Fig. 1 werden für die minimale Stützdicke  $d_S \min = 17,5 \text{ nm}$ , die maximale Stützdicke  $d_S \max = 25 \text{ nm}$  und für den Stützexponent  $x = 3$  oder  $x = 4$  ermittelt.

5. Für das Basissystem wird die Admittance  $\mu_S$  in Abhängigkeit von der Metallschichtdicke  $d_M$  ermittelt und in Fig. 2 dargestellt. Für die Berechnung gilt die aus der Theorie der induzierten Transmission bekannte Formel

$$\mu_S = \frac{2 X n_D^2}{(n_D^2 + X^2 + Z^2) + [(n_D^2 + X^2 + Z^2)^2 - 4 X^2 n_D^2]^{1/2}} \quad (6)$$

35

unter Benutzung der Formeln (2) bis (5) und mit  $n_D = n_L$ .

6. Für das All-Dielektrik-Filter werden gegen die Außenmedien mit der Brechzahl 1 für die Reflektoren die reellen Admittancewerte  $\mu_A$  ermittelt:

p	$\mu_A$
1	0,5102
2	0,2603
3	0,1328
4	0,0678
5	0,0346

wobei p der laufende Periodenexponent bedeutet. Für die Berechnung gilt die aus der Interferenzschichtoptik bekannte Formel

$$\mu_A = \left( \frac{n_L}{n_K} \right)^{2p} \mu_S \quad (7)$$

65

mit den entsprechenden Brechzahlen bei der Mittenwellenlänge und  $n_s = 1$ . Die Admittanzen sind in Fig. 2 eingezzeichnet.

7. Der Schnittpunkt von Admittanceverlauf des Basisystems und einer Admittancegeraden des All-Dielektrik-Filters zwischen minimaler und maximaler Stützdicke in Fig. 2 liefert für die Stützdicke  $d_s = 20.5 \text{ nm}$ , was den Stützexponenten endgültig mit  $x = 4$  festlegt, und für die Stützadmittance  $\mu_s = 0.1329$ . Für die Stützperiode gilt  $p = 3$ .

8. Das Stützsystem hat die Form

$$\mu_s (c_s L d_s M c_s L)^x \mu_s$$

bzw. mit den konkreten Werten

$$\mu_s (0.815L 20.5M 0.815L)^4 \mu_s$$

wobei  $c_s$  für die optische Dicke der Phasenschicht und  $d_s$  für die geometrische Dicke der Metallschicht steht.  $c_s$  ist mit (2) bis (5) und  $n_D = n_L$  nach der aus der Theorie der Induzierten Transmission bekannten Formel

$$c_s = \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{2 Z n_D}{n_D^2 - X^2 - Z^2} \right) + 1 \quad (8)$$

berechnet worden.

9. Das All-Dielektrik-Filter wird nach 6 Schichten bzw. 3 Schichtpaaren mit dem Stützsystem erweitert und anschließend unverändert belassen. Das fertige metallgestützte Interferenzfilter hat das Design

$$1.0 [(H L)^3 (0.815L 20.5M 0.815L)^4 (H L)^2 2H (L H)^5] 1.0$$

Die Fig. 3 zeigt für das Beispiel den für ein metallgestütztes Filter typischen Verlauf der Reflexion in Abhängigkeit von den Schichten bei der Mittenwellenlänge. Die Fig. 4 und 5 zeigen den Transmissions-Verlauf im Durchlaßbereich bzw. im gesamten Bereich des fertigen Filters auf einem Quarzsubstrat mit Berücksichtigung der Substratrückseite.

In der Fig. 6 sind vergleichsweise gegenübergestellt, mit der Transmission in logarithmischer Darstellung in Abhängigkeit von der Wellenzahl (reziproke Wellenlänge), das Beispiel für das erfindungsgemäße Filter (metallgestützt), ein vergleichbares Filter aus All-Dielektrik-Filter und kohärent gekoppeltem Induced-Transmission-Filter (ADF + ITF kohärent) und ein Vergleichbares Filter aus inkohärent verbundenem All-Dielektrik-Filter, UV-Farbglass und dielektrischen Kurzpaß (ADF + Farbgl. + KPF inkohärent).

Die eingangs geforderten Parameter der Filterfunktion sind bei diesem Beispiel erreicht und somit keine weiteren Blockelemente notwendig. Die Schichtenzahl von 29 stellt interferenzoptisch ein absolutes Minimum dar. Ein vergleichbares System mit der bekannten kohärenten Kopplung von Induced Transmission-Filter und All-Dielektrik-Filter ist dagegen beispielsweise mit 43 Schichten herstellbar, ein solches mit bekannter inkohärenter Kombination besteht mindestens aus All-Dielektrik-Filter, Farbglas und UV-Kurzpaßfilter (Fig. 6).

45

50

55

60

65

Tabelle 1

Brechungs- und Absorptionsindizes der verwendeten Materialien

$\lambda$ (nm)	n <sub>3</sub>	n <sub>L</sub>	n <sub>H</sub>	k <sub>3</sub>	n <sub>M</sub>	k <sub>M</sub>
200	1,63	1,63	2,800	0,2800	0,12	2.30
250	1,54	1,54	2,240	0,0060	0,20	2.96
300	1,50	1,50	2,100	0,0001	0,28	3.61
350	1,48	1,48	2,050	0	0,39	4.23
400	1,47	1,47	2,002	0	0,49	4.86
500	1,46	1,46	1,960	0	0,77	6.08
600	1,46	1,45	1,940	0	1,20	7.26
700	1,45	1,45	1,930	0	1,83	8.31
800	1,45	1,45	1,923	0	2,80	8.45
900	1,45	1,45	1,913	0	2,06	8.30
1000	1,45	1,45	1,905	0	1,35	9.58

## Patentansprüche

1. Interferenzfilter, das aus einer Kombination aus ausschließlich aus dielektrischen Schichten und in alternierender Folge aus dielektrischen und metallischen Schichten gebildeten Teil, in einer Cavity-Anordnung eine Abstandsschicht aufweisend, gebildet ist, dadurch gekennzeichnet, daß ein aus den Metall- und Dielektrischschichten gebildetes Stützsystem (S) in das Filter unsymmetrisch eingefügt ist.
2. Interferenzfilter nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Stützsystem (S) unsymmetrisch zur Abstandsschicht (HA) in den aus alternierend hoch- und niedrigbrechendem dielektrischen Material (H, L) gebildeten Teil eingefügt ist.
3. Interferenzfilter nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Summe der Dicken der Metallschichten (M) des Stützsystems (S) in etwa den Wert einer Metallmindestdicke ( $d_{min}$ ) erreicht.
4. Interferenzfilter nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß auf einem Substrat die einzelnen Schichten (L, H, HA, M) mit einem einzigen Beschichtungsverfahren aufbringbar sind.
5. Interferenzfilter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Metallschichten (M) des Stützsystems (S) aus Al, Ag, Au, Rh oder Cu bestehen.
6. Interferenzfilter nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Dielektrischschichten aus  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  oder  $\text{LaF}_3$  gebildet sind.

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

55

60

65

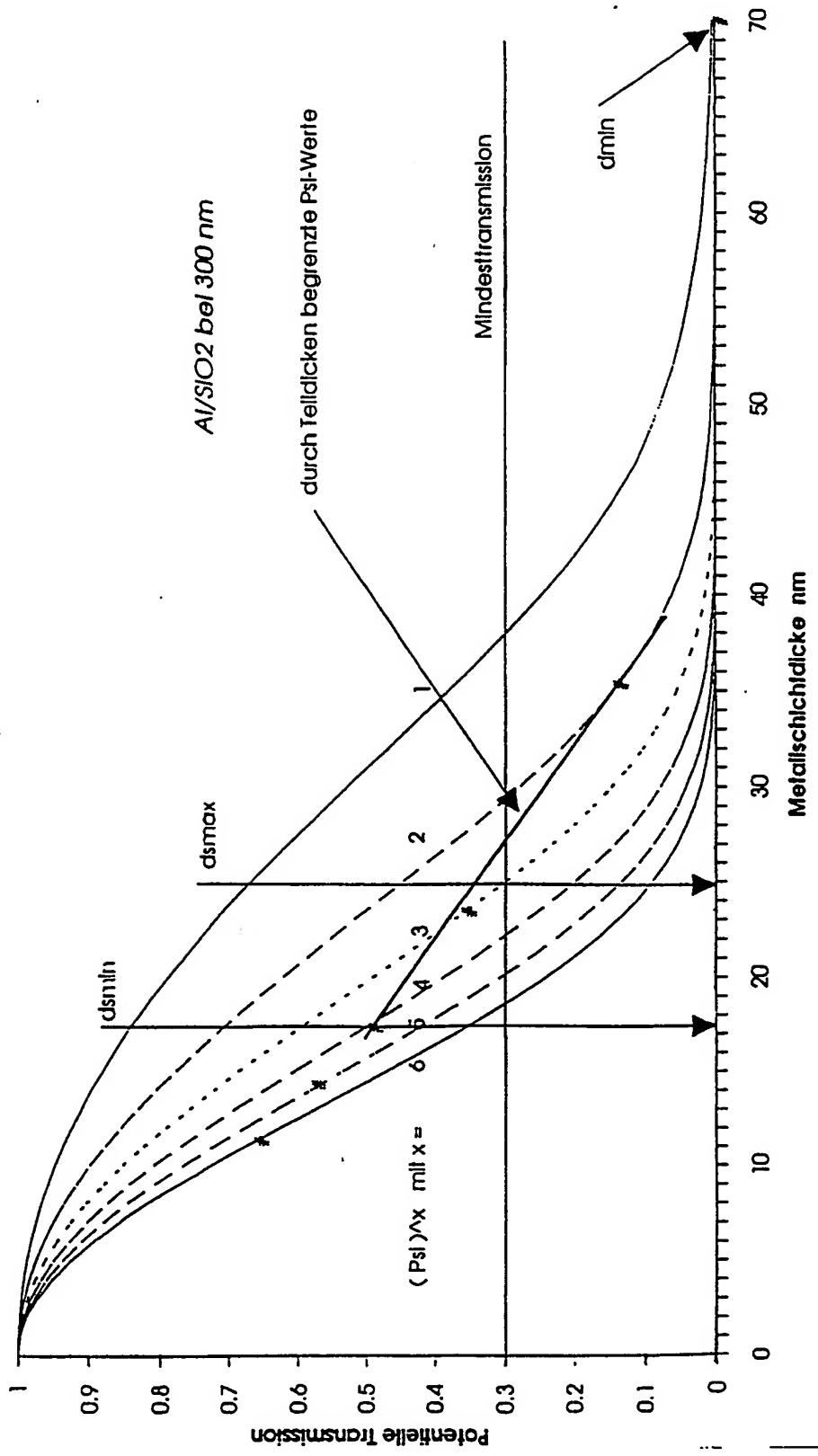
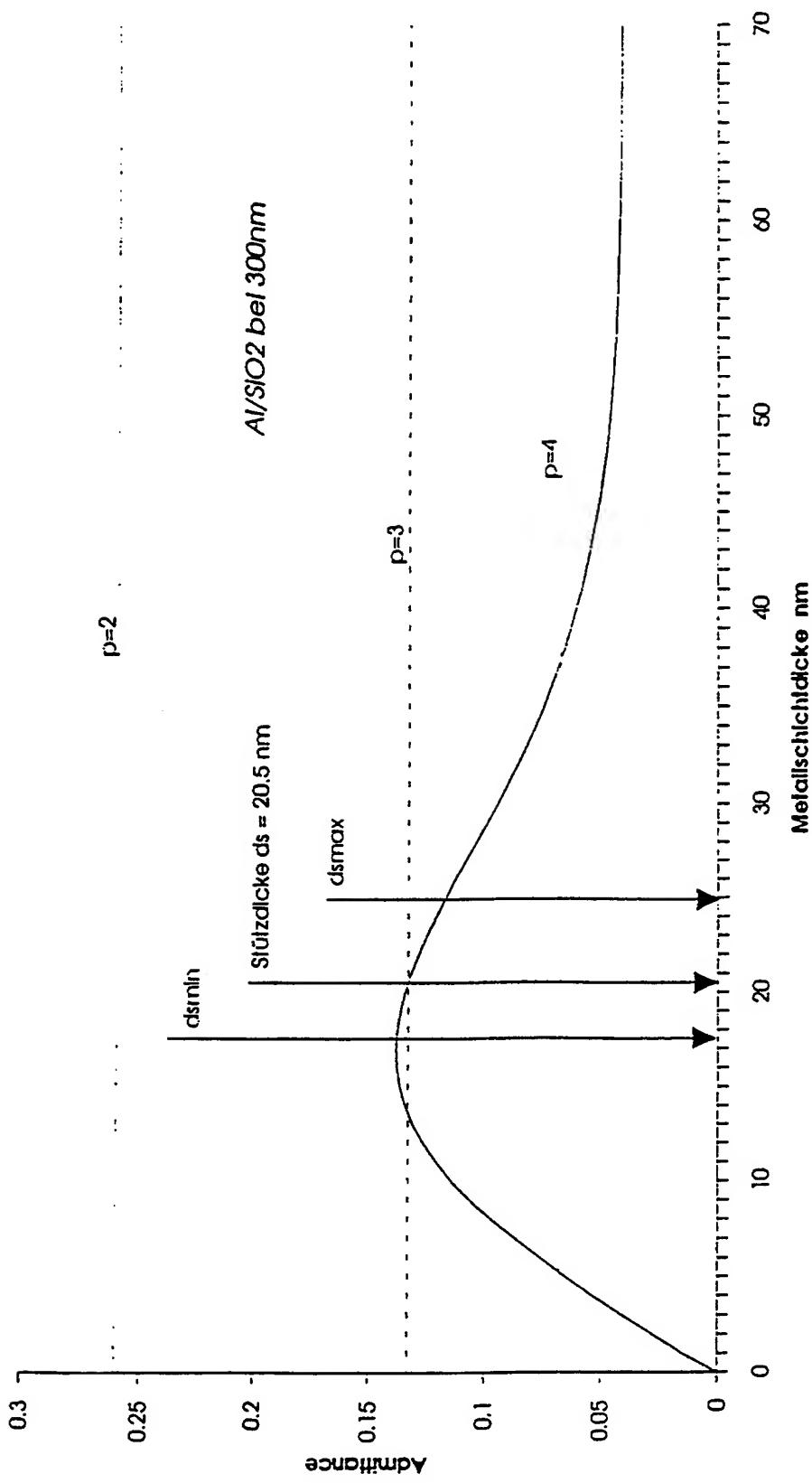
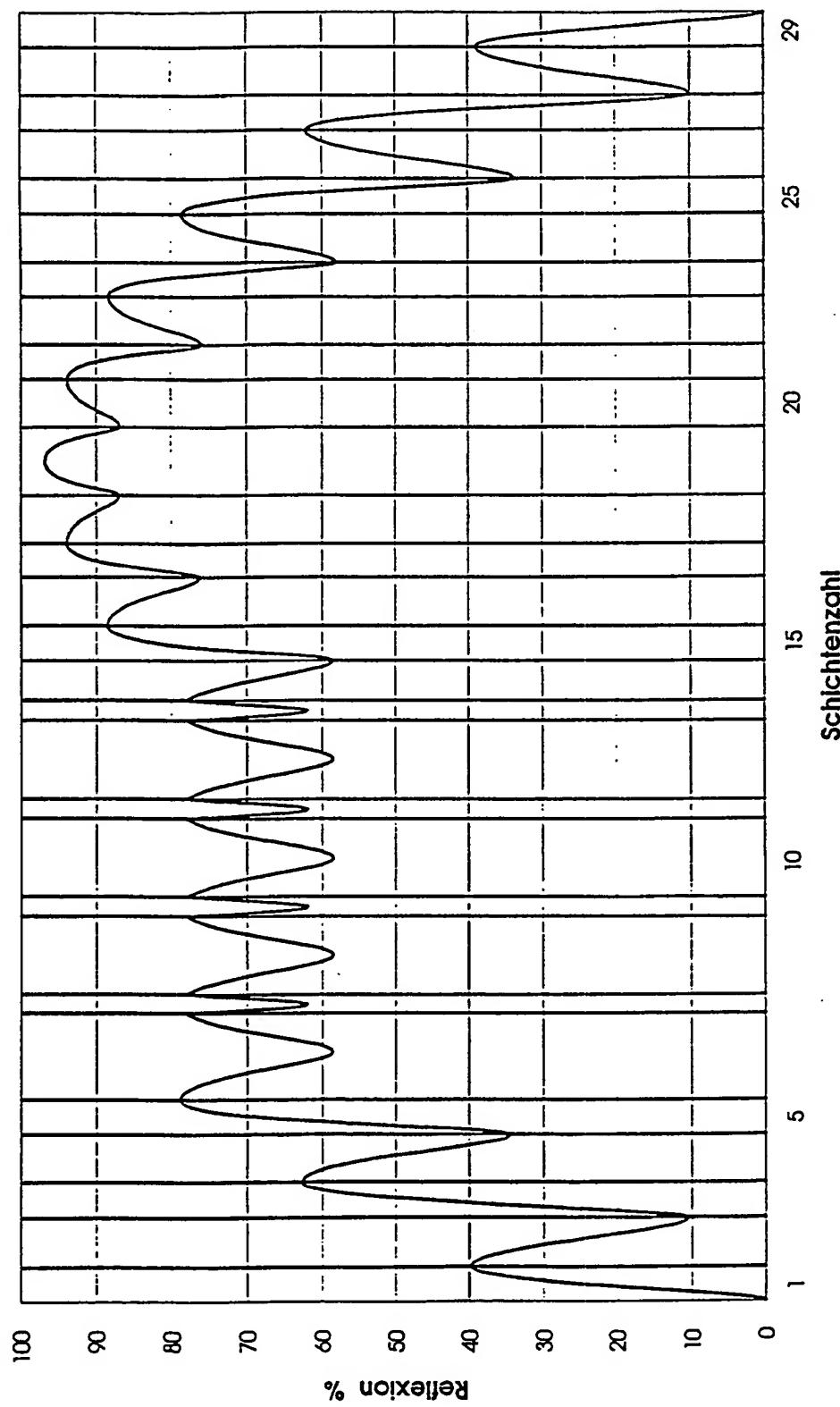


Figure 1



Figur 2



Figur 3

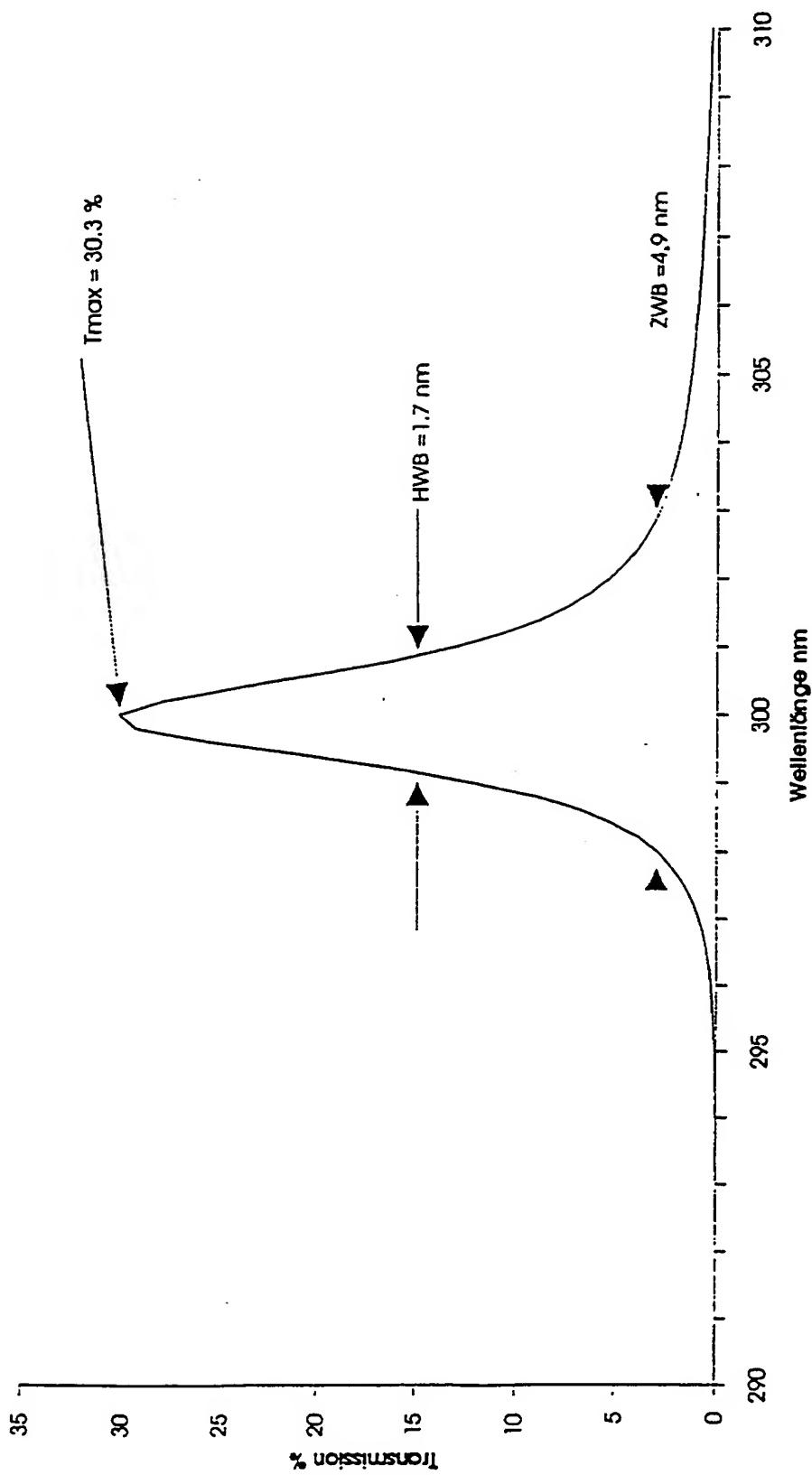


Figure 4

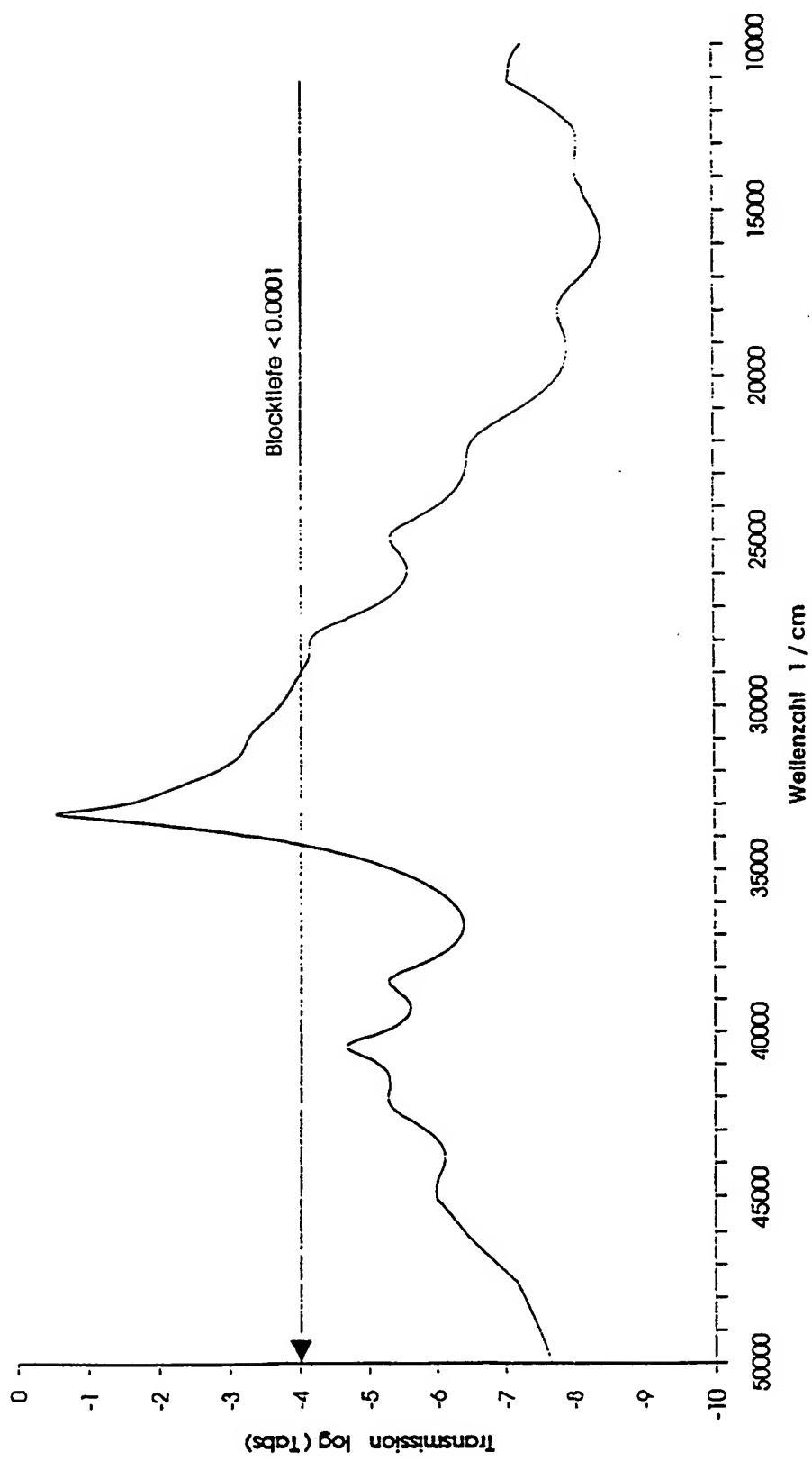
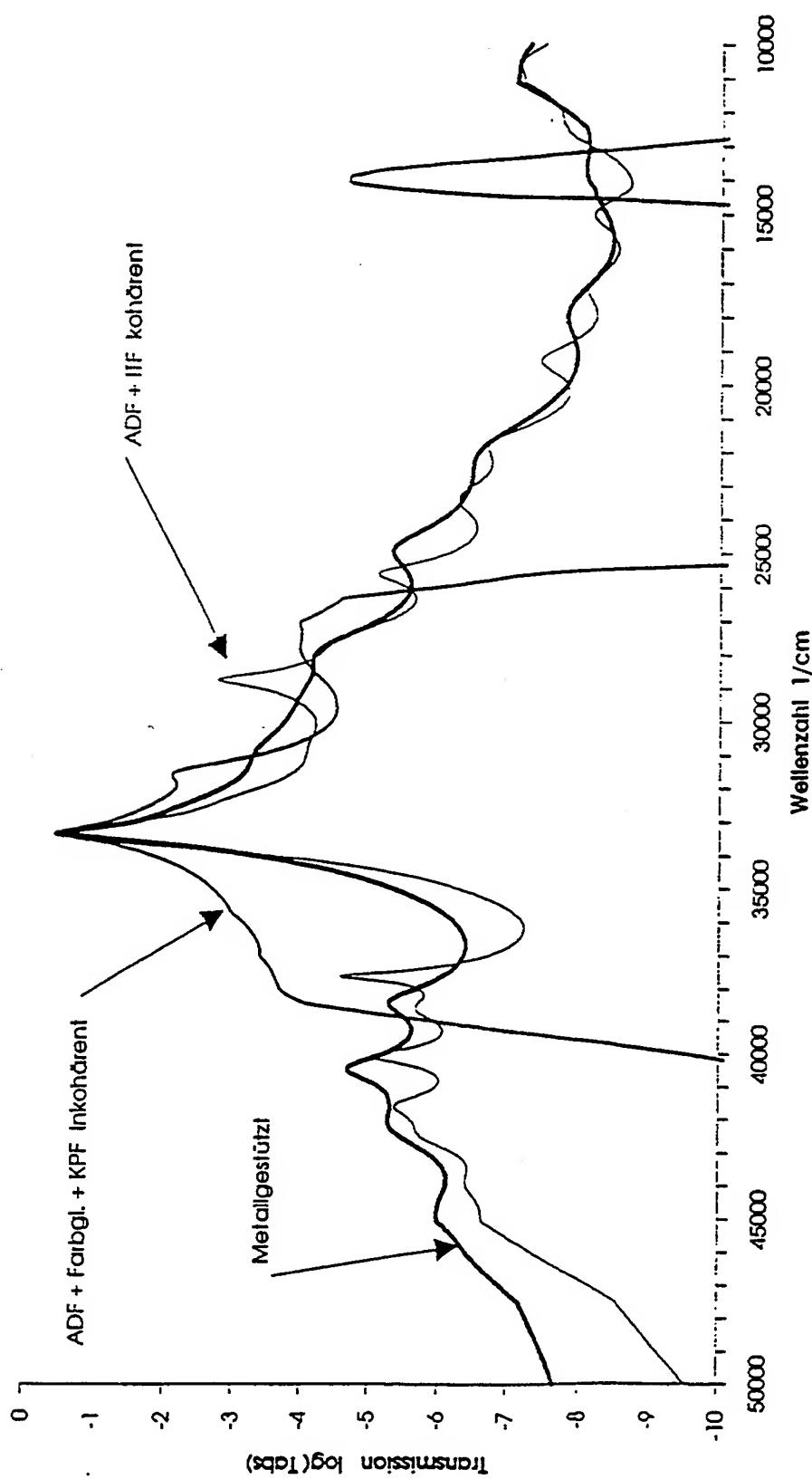


Figure 5



Figur 6

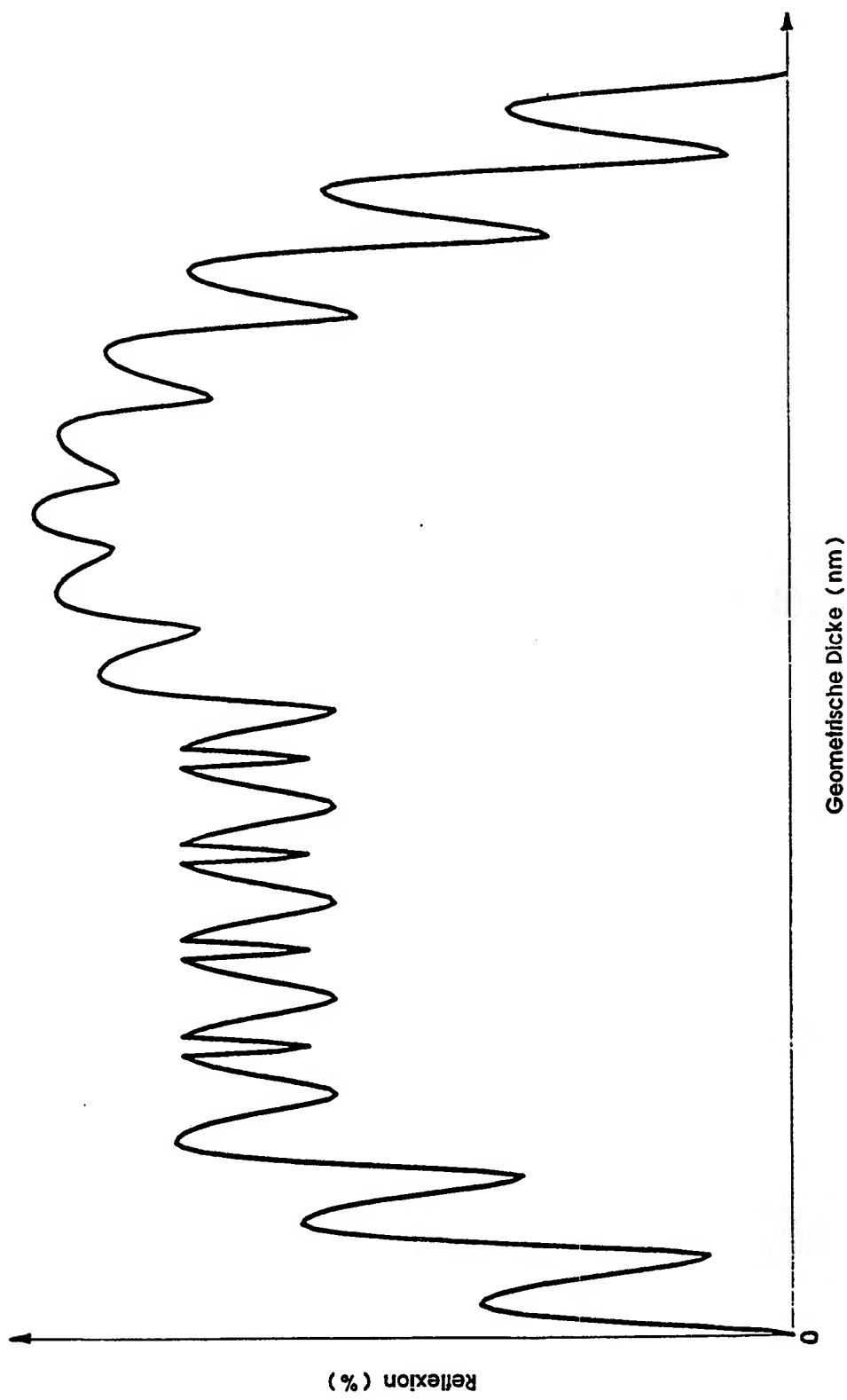
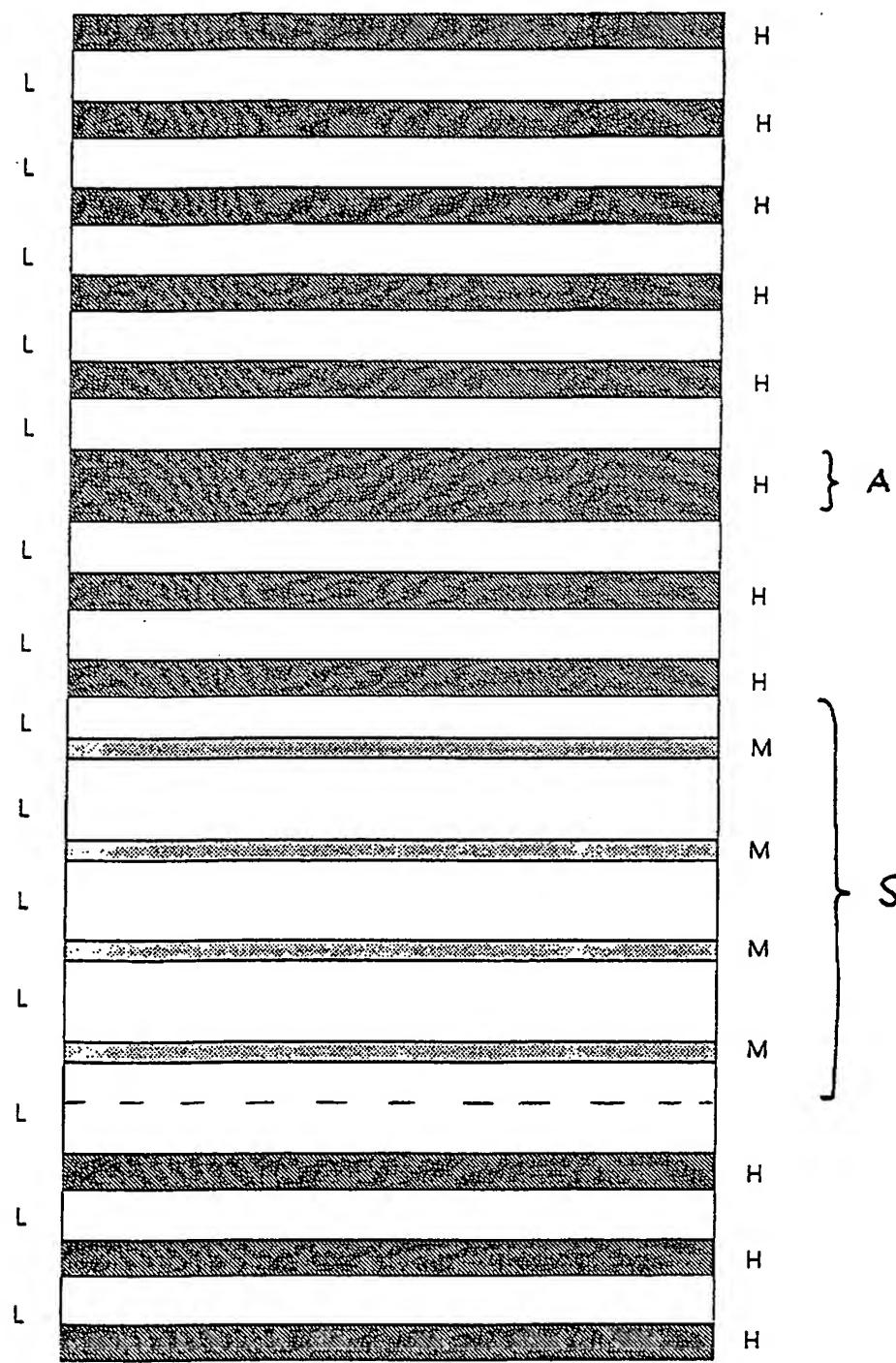


Figure 7



Figur 8

BEST AVAILABLE COPY